

## Obtención por medio de análisis de ruido del cuarto polo de un sensor capacitivo de presión

**C. Montalvo**

*Amerpren, ETSI de Minas, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Ríos Rosas, 21, 28003 Madrid, España  
crisrina.montalvo@upm.es*

**J. Blázquez**

*División de Fisión Nuclear, CIEMAT. Avda. Complutense, 22; 28040 Madrid, España Afiliación*

**A. García-Berrocal, M. Balbás**

*Amerpren, ETSI de Minas, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Ríos Rosas, 21, 28003 Madrid, España*

---

### Resumen

*Los sensores capacitivos tipo Rosemount utilizados para la medida de la presión y el caudal en las centrales nucleares pueden monitorizarse por medio de la técnica de análisis de ruido. Gracias a esta técnica se puede medir el tiempo de respuesta del sensor, magnitud utilizada para su vigilancia, sin interrumpir la operación de la planta. Hasta ahora el modelo del sensor había empleado una función de transferencia con tres polos, dos complejos conjugados y uno real. No obstante, el trabajo en laboratorio ha demostrado que el sensor posee dos polos reales en vez de uno, y que éstos determinan el valor del tiempo de respuesta. Por tanto, podría aplicarse el análisis de ruido basado en el Dynamic Data System, y sería posible obtenerlos con un ajuste autorregresivo de su PSD empleando cuatro coeficientes. En este trabajo, las señales tomadas de la planta se analizan y se consigue encontrar el segundo polo real, evaluando así su contribución al tiempo de respuesta.*

---

### INTRODUCCIÓN

Los sensores de presión capacitivos tipo Rosemount son ampliamente utilizados para la medida de presión y caudal en las centrales nucleares[1]. La medida del tiempo de respuesta se utiliza como parámetro para caracterizar la respuesta dinámica del sensor y de la línea sensora a la que está acoplado[2].

En la literatura, se encuentran modelos del sensor con tres polos, dos complejos conjugados y uno real[3-6], de manera que el tiempo de respuesta está dado por el valor inverso del polo real. No obstante, la evidencia empírica en laboratorio ha demostrado que el sensor posee dos polos reales[7,8]; uno de alta frecuencia cuya contribución al tiempo de respuesta es muy pequeña, y otro de baja frecuencia, que determina principalmente el valor del tiempo de respuesta.

Según la metodología del Dynamic Data System (DDS)[9,10], sabiendo que existen cuatro polos, sería posible obtener un modelo autorregresivo de cuatro coeficientes que representara la función de transferencia del sistema sensor-línea. El modelo autorregresivo se obtiene a partir del análisis de ruido de la señal y de las ecuaciones de Yule-Walker.

La técnica del análisis de ruido se basa en la medida de las fluctuaciones naturales que existen a la salida de los sensores de presión mientras la planta está en operación[11]. Es una herramienta muy efectiva para análisis de señal debido a su sensibilidad y porque al tratarse de un método pasivo, no requiere introducir instrumentación especial en el reactor, de manera que la operación no se ve alterada por la medida de parámetros dinámicos[12]

En este trabajo se analizan con las técnicas de análisis de ruido tres señales procedentes de tres sensores Rosemount capacitivos utilizados para la medida de caudal en una planta nuclear. Se obtienen los polos de la función de transferencia del sistema sensor-línea aplicando la metodología DDS. Por último, se comparan los valores de los tiempos asociados a los polos reales con los hallados en laboratorio.

### MEDIDA DEL TIEMPO DE RESPUESTA EN LABORATORIO

El tiempo de respuesta caracteriza el comportamiento dinámico del sensor y es la magnitud elegida por las autoridades reguladoras para controlar la integridad de los sensores de presión capacitivos [13,14].

Una manera de medir el tiempo de respuesta consiste en separar el sensor de su línea sensora y obtener en laboratorio la Densidad Espectral de Potencia (PSD) de la señal procedente de la respuesta del sensor ante un ruido blanco tal y como se muestra en la Fig.1).

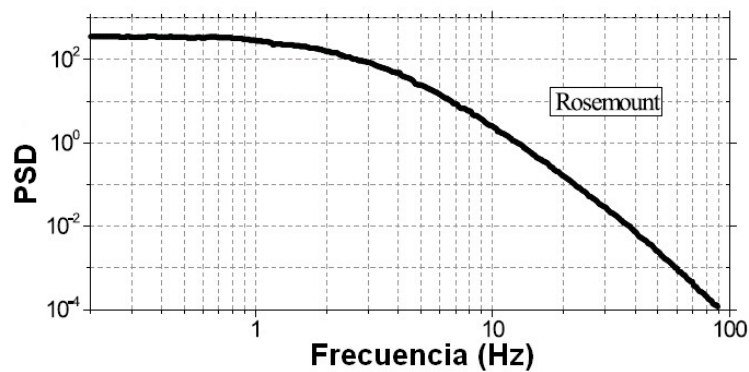


Fig.1. Densidad Espectral de Potencia de la señal de salida de un sensor capacitivo de presión

Por medio de este test se puede comprobar que el sensor es un sistema cuya función de transferencia tiene dos polos reales [8,15], y su tiempo de respuesta se puede medir por medio de la frecuencia de corte de la caída a 3 dB.

La ventaja de este procedimiento es que se puede estudiar la dinámica del sensor evitándose así todo el ruido que acompaña a la operación de planta. No obstante, para propósitos de vigilancia, este método no tiene ninguna validez, ya que el mantenimiento predictivo del sensor in situ requiere también el análisis de ruido del sensor, de su línea y del ruido asociado al mismo como consecuencia de la operación de la planta.

### MEDIDAS EN PLANTA: VIGILANCIA DEL SISTEMA SENSOR-LÍNEA SENSORA

La vigilancia del sensor en la planta, es decir, la medida del tiempo de respuesta in situ implica el análisis de señales complicadas que dan lugar a un PSD como la mostrada en la Fig. 2).

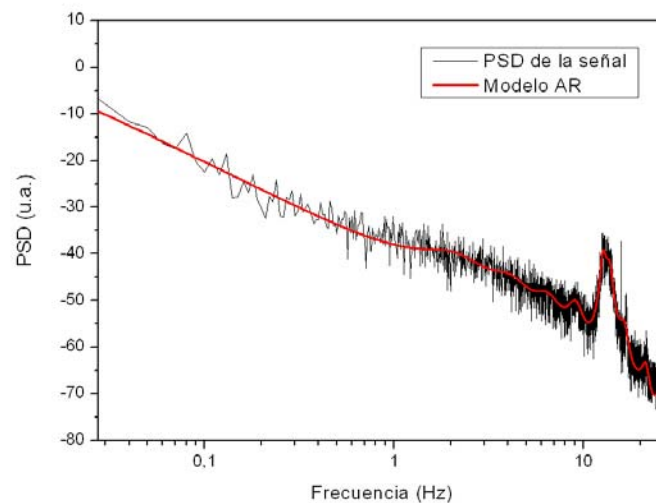


Fig. 2. En negro PSD de la señal de salida de un sensor capacitivo de caudal cuando está acoplado a una línea sensora en una planta nuclear; y en rojo, su ajuste autorregresivo.

Se puede observar que existe un pico resonante correspondiente al acoplamiento entre el sensor capacitivo y la línea sensora. En la literatura, este sistema se ha tratado como un modelo de tres polos, de los cuales, dos de ellos son un par de polos complejos conjugados y el tercero, es un polo real[1,3,4,6,16]. La evidencia empírica ha demostrado que el polo real no es único[7] sino que existe un cuarto polo.

Para la vigilancia avanzada de los sensores, es necesario poder obtener el cuarto polo del sistema sensor-línea sensora in situ, lo que en este trabajo se ha resuelto aplicando el DDS.

### PRECONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE PLANTA

Se han analizado tres señales procedentes de tres sensores de caudal acoplados a sus respectivas líneas sensoras en la planta. La metodología del análisis de ruido permite obtener el modelo autorregresivo del sistema a estudio (sensor-línea sensora) y el DDS indica cuántos coeficientes deben utilizarse para el ajuste.

En la Fig. 3) se muestra la señal obtenida de la planta correspondiente al primer sensor y a su línea sensora.

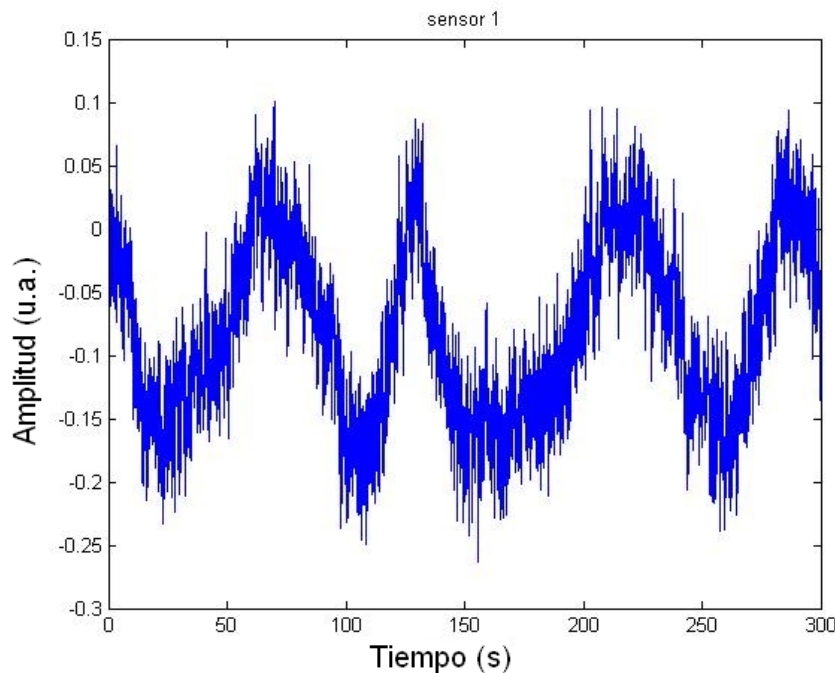


Fig. 3. Señal de planta procedente del sistema sensor-línea sensora

Como se puede observar, existe una tendencia de baja frecuencia en la señal, que no corresponde a la dinámica del sensor; y por tanto, debe aplicarse un filtro pasaaltos para eliminarla.

Así, si se diseña un filtro utilizando la herramienta de Matlab Sptool, se obtiene la señal filtrada que se presenta en la parte inferior de la Fig. 4).

Como se puede apreciar, tras el filtrado, aparentemente se ha podido eliminar la componente de baja frecuencia que no correspondía a la dinámica del sensor y su línea.

### APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DDS

Una vez precondicionadas las señales de los sensores, se pueden obtener las PSDs de los mismos, así como sus modelos autorregresivos de cuatro coeficientes. En la Fig. 5) se muestra la PSD del primer sensor analizado y su correspondiente ajuste autorregresivo.

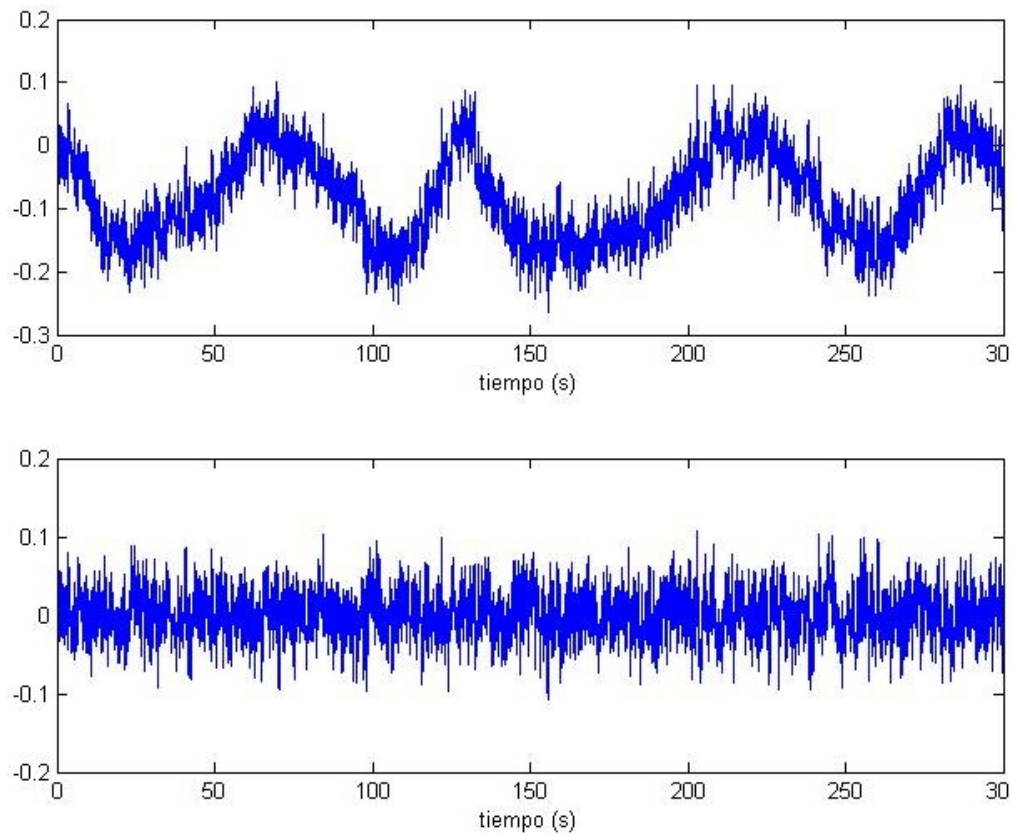


Fig. 4. Señal de salida de un sensor de presión capacitivo sin filtrar (arriba) y señal filtrada tras aplicar un filtro pasaaltos (abajo).

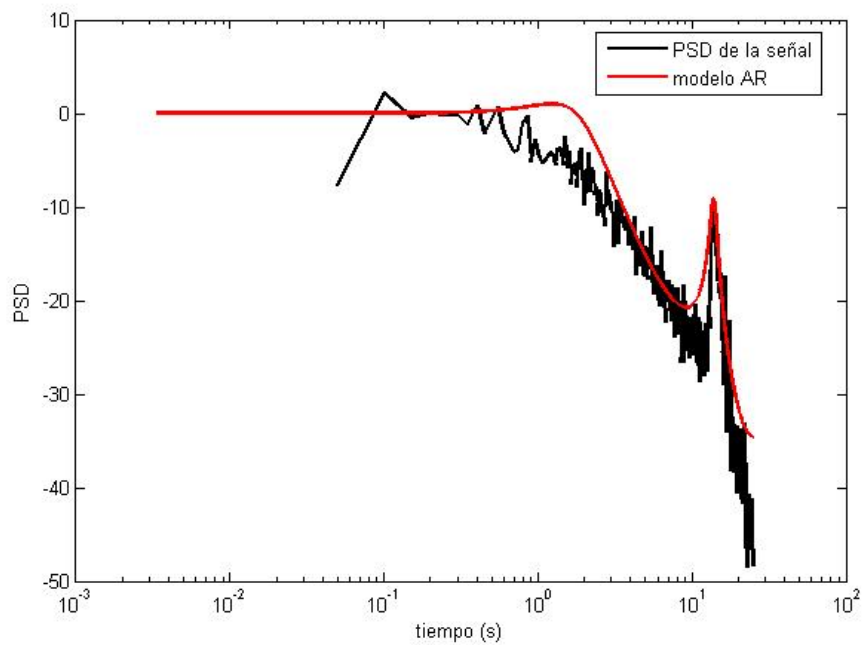


Fig. 5. PSD de la señal de un sensor de presión capacitivo y su ajuste AR con cuatro coeficientes

Como se puede ver, el ajuste autorregresivo de cuatro coeficientes no es suficiente para reproducir la PSD de la señal del sensor. Además, al calcular los polos de la función de transferencia obtenida con el modelo AR, no se obtienen los cuatro polos esperados ( dos reales y dos complejos ), sino que aparece un polo complejo de baja frecuencia que no se esperaba. En efecto:

$$\begin{aligned} p_1 &= -3,9072 + 87,0700i \\ p_1^* &= -3,9072 - 87,0700i \\ p_2 &= -6,1338 + 9,7450i \\ p_2^* &= -6,1338 - 9,7450i \end{aligned} \quad (1)$$

Siendo  $p_1$  y  $p_1^*$  el par de polos complejos conjugados correspondientes al acoplamiento entre la línea sensora y el sensor de presión capacitivo, y  $p_2$  y  $p_2^*$ , el par de polos complejos conjugados procedentes de otros fenómenos de la planta y no asociados a la dinámica del sensor.

No obstante, dado que filtrar es una operación que podría eliminar del espectro alguno de los polos reales del sensor, se ha preferido asumir la componente espúrea asociada a  $p_2$  y  $p_2^*$ , y ajustar la PSD con seis coeficientes autorregresivos. Así, el par de coeficientes a añadir debe corresponder a los dos polos reales que contribuyen al tiempo de respuesta del sensor. En la Fig.6) se muestra dicho ajuste.

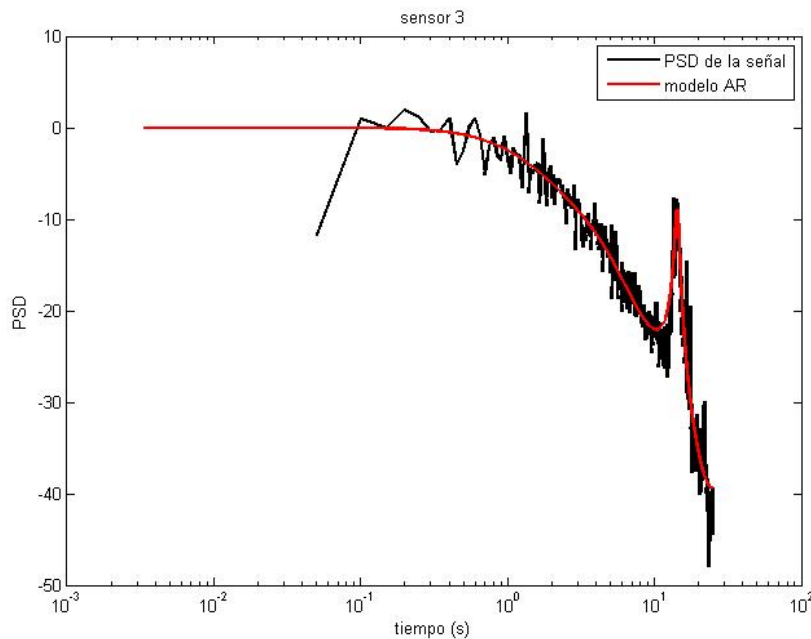


Fig.6. PSD de la señal de un sensor capacitivo de presión y su ajuste AR con seis coeficientes.

La elección de seis coeficientes parece gráficamente adecuada para ajustar correctamente la PSD de la señal del sensor. Si se calculan los polos de la función de transferencia obtenida se tiene:

$$\begin{aligned} p_1 &= -2,9516 + 89,8452i \\ p_1^* &= -2,9516 - 89,8452i \\ p_2 &= -25,9637 + 22,0523i \\ p_2^* &= -25,9637 - 22,0523i \\ p_3 &= -6,5987 \\ p_4 &= -96,3488 \end{aligned} \quad (2)$$

Siendo  $p_1$  y  $p_1^*$  el par de polos complejos conjugados correspondientes al acoplamiento entre la línea sensora y el sensor de presión capacitivo,  $p_2$  y  $p_2^*$ , son los polos complejos de la componente de baja frecuencia que no se ha podido eliminar mediante el filtrado, y  $p_3$  y  $p_4$  son los dos polos reales del sensor. Las frecuencias de corte de estos últimos polos y los tiempos asociados a los mismos se muestra en la Tabla 1).

*Tabla 1: Frecuencias de corte y tiempos de respuesta asociados los polos reales*

Polo	Frecuencia de corte (Hz)	Tiempo de respuesta
$p_3$	$f_3 = 1,05$	$\tau_3 = 0,15$
$p_4$	$f_4 = 15,33$	$\tau_4 = 0,01$

Los tiempos de los polos reales son consistentes con las medidas de laboratorio, siendo uno de los polos de alta frecuencia y, en consecuencia, su contribución al tiempo de respuesta muy pequeña. Debido a su ubicación en el espectro, entre el par de polos complejos de alta frecuencia y el polo real de baja frecuencia, su estimación se ve dificultada.

Los otros dos sensores analizados han dado lugar a resultados muy parecidos, pudiéndose encontrar el cuarto polo al considerar una función de transferencia de seis coeficientes autorregresivos, lo que valida la consistencia de la aplicación en planta de esta metodología.

## CONCLUSIONES

Se ha obtenido por medio del análisis de ruido el cuarto polo de un sistema formado por un sensor de presión capacitivo tipo Rosemount y la línea sensora acoplada al mismo. A diferencia de estudios anteriores, en este trabajo se propone obtener la función de transferencia del sistema por medio del análisis de ruido de la señal in situ, sin necesidad de interrumpir la operación de la planta y sin llevar el sensor a estudio en un laboratorio.

Para encontrar el segundo polo real del sensor se ha aplicado la metodología del Dynamic Data System. Se ha comprobado que ante la imposibilidad de eliminar aquellas componentes de baja frecuencia procedentes de la operación de la planta, éstas deben incluirse en el ajuste autorregresivo y no tenerse en cuenta para el cálculo del tiempo de respuesta del sensor.

La dinámica del sensor queda mejor caracterizada con un modelo de cuatro polos, dado que el cuarto polo encontrado contribuye al tiempo de respuesta, magnitud utilizada para su vigilancia.

## REFERENCIAS

- [1] A García-Berrocal, J Chicharro, J Blázquez, M Balbás. Non-linear noise analysis from a capacitive pressure transmitter, Mechanical Systems and Signal Processing. 18 (2004) 187-197.
- [2] H Hashemian, Maintenance of process instrumentation in nuclear power plants Power systems, Springer 2006.
- [3] J Ballestrin, J Blázquez, D Cillero, R Sansa, O Vela, Proyecto VISSP: Vigilancia in situ de sensores de presión, ITN/TS-22/IF-95 (1996).
- [4] J Barbero, J Blázquez, O Vela. Bubbles in the sensing line of nuclear power plant pressure transmitters: the shift of spectrum resonances, Nucl.Eng.Des. 199 (2000) 327-334.
- [5] JM Chicharro, A García-Berrocal, M Balbás, J Blázquez. Pressure Transmitter Surveillance Using Quaternion Numbers, Mechanical Systems and Signal Processing. 16 (2002) 1083-1091.
- [6] García-Berrocal, J Chicharro, M Balbás, J Blázquez. A fuzzy logic approach for noise signal reconstruction: Application to pressure sensors, Mechanical Systems and Signal Processing. 19 (2005) 501-508.
- [7] O Glöckler. Estimating the Response Times of SDS Pressure/Flow Transmitters and Their Sensing Lines via In-Situ At-Power Noise Measurements in Bruce-B Unit 6, Report No.NK29-REP-63700-00001- R. (2000).

- [8] O Glöckler. Reactor noise measurements in the safety and regulating systems of CANDU stations, *Prog.Nuclear Energy*. 43 (2003) 75-82.
- [9] SM Wu, C Hsu, MC Chow. The determination of time constants of reactor pressure and temperature sensors: the Dynamic Data System (DDS) method, *Nucl.Sci.Eng.* (1979).
- [10] SM Wu. Dynamica Data System-a new modelling approach. *Transactions ASME*. 991 (1977).
- [11] HM Hashemian, *Maintenance of Process Instrumentation in Nuclear Power Plants*, Springer, Berlin, 2006.
- [12] J Ortiz-Villafuerte, R Castillo-Durán, G Alonso, G Calleros-Micheland. BWR online monitoring system based on noise analysis, *Nucl.Eng.Des.* 236 (2006) 2394-2404.
- [13] ME Buchanan, LF Miller, JA Thie, TW Kerlin, GE Ragan, J March-Leuba, Measurement of response time and detection of degradation in pressure sensor/sensing line systems, (1985).
- [14] HM Hashemian, DW Mitchell, RE Fain, KM Petersen, Long term performance and aging characteristics of nuclear plant pressure transmitters, (1993).
- [15] O Glöckler. Estimating the Response Times of SDS Pressure/Flow Transmitters and Their Sensing Lines via In-Situ At-Power Noise Measurements in Bruce-B Unit 6, Report No.NK29-REP-63700-00001- R. (2000).
- [16] J Blazquez, J Ballestrin. Pressure transmitter surveillance: the dominant real pole case, *Prog.Nuclear Energy*. 29 (1995) 139-145.